

文章编号:1007-2780(2011)03-0364-06

基于 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法的 改进运动估计算法

邓建青^{1,2}, 刘晶红^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 针对超分辨率图像重建中图像运动估计精度要求高, 速度要求快的问题, 对传统的基于 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法的运动估计方法做出以下改进: 首先提取参考图像和待估计图像的边缘, 从而避免了 Fourier-Mellin 变换的不足(对细节不明显的图像运动估计精度极差); 由于只是用 Fourier-Mellin 变换进行粗估计, 对角度估计精度要求不高, 只需小于 1° , 因此在进行对数极坐标变换时, 可以减少角度坐标和对数坐标的采样点数, 大幅缩小了矩阵大小, 提高了运动估计速度; 由于先用 Fourier-Mellin 对待估计图像进行粗估计, Keren 算法可以避免复杂的金字塔计算而只需一层估计, 减少了运动估计时间。在 VC++ 中的仿真实验表明, 该方法有效地结合了 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法的优点, 同时又提高了运动估计速度。经测试, 用未改进的算法对 328×500 像素大小的两幅图像进行运算估计需要 3.53 s, 而用改进的算法则只需要 1.15 s, 大大提高了运动估计速度。

关 键 词: 超分辨率; Fourier-Mellin 变换; Keren 算法; 边缘提取; 采样; 运动估计

中图分类号: TP911.73 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20112603.0364

Improved Motion Estimation Algorithm Based on Fourier-Mellin Transform and Keren Algorithm

DENG Jian-qing^{1, 2}, LIU Jing-hong^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Because Super-resolution image reconstruction requires high precision and high speed of motion estimation of image, so it is proposed to make three improvements with the traditional Fourier-Mellin transform and Keren algorithm of motion estimation: to avoid the shortcoming of Fourier-Mellin transformation (bad registration accuracy of image with poor details), edge detection of the image in advance is made; as Fourier-Mellin transformation is used for coarse estimation, the number of sampling points is reduced during the log polar transform with the angle accuracy below 1° , which greatly reduced the size of matrix, and increased the rate of registration; with Fourier-Mellin transformation being used for coarse estimation firstly, do not need to use the pyramid of Keren algorithm, but only need one layer for motion estimation so that to reduce the registration time. The simulation in VC++ shows that the method is effective in maintaining the advantages of Fourier-Mellin transform and

收稿日期: 2010-11-28; 修订日期: 2010-12-16

基金项目: “973”国家自然科学基金项目(No. 2009CB72400607); “863”国家自然科学基金项目(No. 2008AA121803)

作者简介: 邓建青(1987—), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要研究方向为基于 DSP 的图像超分辨率重建。

* 通讯联系人, E-mail: liu1577@126.com

Keren algorithm, at the same time improving the speed of motion estimation. According to the experiment, with the traditional algorithm it needs 3.53 s to do motion estimation of image with 328 multiply 500 pixels, but needs 1.15 s with the improved algorithm which greatly improve the speed.

Key words: super-resolution; Fourier-Mellin transformation; Keren algorithm; edge detection; sampling; motion estimation

1 引言

超分辨率图像重建是指充分利用获取的多幅低分辨率图像所包含的非冗余信息^[1], 经过亚像素级的图像估计或运动估计, 通过信息融合技术^[2]重建一幅高分辨率图像或一个高分辨率图像序列。重建过程中, 关键因素是像素之间运动估计的可靠性^[3]。

Fourier-Mellin 变换适用于大角度、大位移的运动估计^[4], 而 Keren 算法只适用于小角度的估计, 因此李相国等人提出了基于相位相关与 Keren 算法的图像配准, 融合二者优点^[5]。本文在此基础上提出改进算法, 不仅综合了 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法的优点, 可以对任意大小角度和位移的图像进行运动估计, 而且实现了对细节不明显的图像运动估计, 并提高了运动估计速度。

2 算法原理

2.1 边缘提取

图像的边缘是图像最基本也是最重要的特征之一^[6], 图像的大部分信息都存在于图像的边缘中, 且基于边缘的运动估计算法抗噪能力强, 适用于图像细节不明显的情况, 故本文在进行运动估计之前, 先提取图像的边缘。目前边缘检测的方法有很多, 其中 Sobel 算子比较容易实现, 且受噪声影响较小, 因此采用 Sobel 算子进行边缘提取。垂直方向的模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

水平方向的模板为:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

对于 3×3 的邻域, 中心点在垂直方向上的偏

导数为:

$$H_x = (x_7 + 2 \times x_8 + x_9) - (x_1 + 2 \times x_2 + x_3) \quad (1)$$

中心点在水平方向上的偏导数为:

$$H_y = (x_3 + 2 \times x_6 + x_9) - (x_1 + 2 \times x_4 + x_7) \quad (2)$$

然后求出梯度幅值 $G(x, y)$:

$$H(x, y) = \sqrt{H^2 x + H^2 y} \quad (3)$$

然后再用二分法自动选择阈值, 最后得到边缘图像像素值为:

$$H'(x, y) = \begin{cases} 255, & H(x, y) \geq T \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 Fourier-Mellin 变换法

假设图像间存在平移、旋转和比例变换^[7], 即图像 $f(x, y)$ 经平移、旋转、比例变换生成图像 $g(x, y)$, 则有:

$$g(x, y) = f(\alpha x \cos \beta + \alpha y \sin \beta - \Delta x, -\alpha x \sin \beta + \alpha y \cos \beta - \Delta y) \quad (5)$$

其中, α 为比例变换因子, β 为相对旋转角度, $(\Delta x, \Delta y)$ 为相对平移量^[8]。

对上式两边做 Fourier 变换得:

$$G(u, v) = e^{-2\pi j(u\alpha_0 + v\alpha_0)} \frac{1}{\alpha^2} F \times \left[\frac{1}{\alpha} (u \cos \beta + v \sin \beta), \frac{1}{\alpha} (-u \sin \beta + v \cos \beta) \right] \quad (6)$$

根据 Fourier 平移性质可知, 图像的 Fourier 变换的幅值谱是平移不变的, 但比例变换和角度旋转则对幅值有影响^[9]。可以将平移变换与比例变换和旋转进行分离计算^[10], 对两图像的 Fourier 变换取幅值:

$$|G(u, v)| = \frac{1}{\alpha^2} \times \left| F \left[\frac{1}{\alpha} (u \cos \beta + v \sin \beta), \frac{1}{\alpha} (-u \sin \beta + v \cos \beta) \right] \right| \quad (7)$$

将式(7)进行对数极坐标变换^[11]

$$\begin{cases} r = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \theta = \arctan v/u \\ \rho = \ln(r) \end{cases}$$

得到:

$$|G(u, v)| = \frac{1}{\alpha^2} \left| F\left(\frac{r}{\alpha}, \theta + \beta\right) \right| \quad (8)$$

从式(8)中可以看出,在对数极坐标下,Fourier 幅值谱对旋转以及比例变换都具有不变性。将变换后的幅值谱进行相关运算^[12],得到 $-\ln(\alpha)$ 和 β ,从而估计出比例因子 α 和旋转角度 β 。然后将待估计图像按估计出来的参数进行运动补偿,再用相关运算估计出位移 Δx 和 Δy 。

2.3 Keren 算法

同样假设图像间存在平移、旋转和比例变换,即图像 $f(x, y)$ 经平移、旋转、比例变换生成图像 $g(x, y)$,则有:

$$\begin{aligned} g(x, y) = & f(ax \cos\beta + ay \sin\beta - \Delta x, \\ & -ax \sin\beta + ay \cos\beta - \Delta y) \end{aligned} \quad (9)$$

当 β 很小时,将 $\cos\beta$ 和 $\sin\beta$ 进行泰勒展开,保留前两项级数得:

$$\begin{aligned} g(x, y) \approx & f(x - \Delta x + y\beta - x\beta^2/2) \times \\ & (y - \Delta y - x\beta - y\beta^2/2) \end{aligned} \quad (10)$$

对 $f(x, y)$ 二级泰勒展开,取一阶近似后得:

$$\begin{aligned} g(x, y) \approx & f(x, y) - (\Delta x' - y\beta + x\beta^2/2) \times \\ & (\partial f/\partial x) - (\Delta y + x\beta + y\beta^2/2) (\partial f/\partial y) \end{aligned} \quad (11)$$

$g(x, y)$ 以其近似表达式的误差平方和可近似表示为^[13]:

$$\begin{aligned} E(\Delta x, \Delta y, \beta) = & \sum [f(x, y) - \\ & (\Delta x - y\beta + x\beta^2/2) (\partial f/\partial x) - \\ & (\Delta y + x\beta + y\beta^2/2) (\partial f/\partial y) - g(x, y)]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

要求得误差 $E(\Delta x, \Delta y, \beta)$ 的最小值,可以对上式和 $\Delta x, \Delta y, \beta$ 分别求偏导。并令其偏导为0,有:

$$X = C^{-1}V \quad (13)$$

其中:

$$C = \begin{pmatrix} \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 & \sum \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} & \sum R \frac{\partial f}{\partial x} \\ \sum \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} & \sum \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 & \sum R \frac{\partial f}{\partial y} \\ \sum R \frac{\partial f}{\partial x} & \sum R \frac{\partial f}{\partial y} & \sum R^2 \end{pmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} \sum \frac{\partial f}{\partial x} (g - f) \\ \sum \frac{\partial f}{\partial y} (g - f) \\ \sum R (g - f) \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \beta \end{pmatrix}, R = x \frac{\partial f}{\partial y} - y \frac{\partial f}{\partial x}$$

上述结果基于泰勒展开及近似,仅在 $\Delta x, \Delta y$ 和 β 数值较小情况下才可以较好近似,为此,Keren等人提出了结合迭代逼近和由粗到精的金字塔实现。遗憾的是,金字塔分解不能改变旋转角度上的分辨率,使得旋转角度的收敛范围受限,因此,Keren算法仅适用于小旋转角度情形,一般不超出 6° ,这也限制了其应用范围^[1]。

3 算法实现及步骤

Fourier-Mellin 变换算法优点是算法复杂度及计算量与平移及旋转大小无关,而且,在大平移、大旋转时也不降低准确度,缺点是在亚像素级估计方面精度欠缺。

而 Keren 算法的突出优点是计算简单且精度高,还可以直接达到亚像素精度,其缺点是算法复杂度及计算量和平移大小有关,即大平移时迭代次数及计算量相应地增加,而且需要采用复杂的金字塔实现,尤其是不适用大旋转角度情形。

如果能够把图像间的旋转角估计精度约束到 1° 范围内,平移估计精度约束到1个像素以内,那么,用 Keren 算法进行运动估计时,就不需要用金字塔进行精确估计,而只需要用一层进行估计,且估计精度直接达到最高。基于 Fourier-Mellin 变换算法和 Keren 算法的运动估计算法可以结合二者的优点,且避开了二者的局限与不足。

3.1 采样数确定

Fourier 对数极坐标变换前首先要确定采样数,在以频谱原点为圆心的幅值图像中,角度方向与半径方向上的微小变化对应着对数极坐标域中 θ 轴和 ρ 轴两个方向上的变化:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta l}{r}, \Delta\rho = \frac{\Delta r}{r}$$

其中 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\rho$ 分别为角度方向和对数半径方向的变化量, Δl 为幅值图像中以频谱中心为圆心的相邻两点的弧长, Δr 为幅值图像中半径方向上的

变化量, r 为半径坐标。对数极坐标域中的最高分辨率由 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\rho$ 的最小值来确定。对于离散图像, $(\Delta r)_{\min} = 1, (\Delta l)_{\min} = 1$, 因此 $(\Delta\theta)_{\min} = \frac{1}{r_{\max}}$, $(\Delta\rho)_{\min} = \frac{1}{r_{\max}}$, 其中 $(\Delta\theta)_{\min}$ 和 $(\Delta\rho)_{\min}$ 分别是角度方向和对数方向的最小值, r_{\max} 为幅值图像的最大半径。

因此, 为使估计精度达到最高, 必须保留幅值图像中的所有信息内容, 在对数极坐标域中所需的采样数计算如下:

$$N_{\theta} = \frac{\pi}{(\Delta\theta)_{\min}} = r_{\max} \pi \quad (14)$$

$$N_{\rho} = \ln(r_{\max}) - \ln(r_{\min}) = r_{\max} \ln\left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}}\right) \quad (15)$$

这里取 $r_{\max} = (W_{\text{power}} - 1)/2, r_{\min} = 10, W_{\text{power}}$ 是运动估计区域的宽度, 这里取 256, 故计算出 $N_{\theta} = 400, N_{\rho} = 324$, 为计算方便取 $N_{\theta} = 512, N_{\rho} = 512$ 。

由于 Fourier-Mellin 变换只用于粗估计, 精度要求不高, 因此 θ 轴和 ρ 轴采样数可以大大减少。假设估计误差在 $\pm 1^\circ$ 以内, 则角度坐标的最小单位为 2° , 即角度坐标的采样点数 $N_{\theta} = 180^\circ / 2^\circ = 90$, 为计算方便, 取 $N_{\theta} = 128, N_{\rho} = 128$ 。本文对图像中 256×256 的区域进行运动估计, 而 Fourier 极坐标变换的矩阵采样矩阵大小只取 128×128 , 即 $N_{\theta} = 128, N_{\rho} = 128$, 对整体估计精度影响不大, 但大大减少了计算量。

3.2 运动估计步骤

第一步: 用 Fourier-Mellin 变换进行估计

(1) 提取参考图像 $f(x, y)$ 和待估计图像 $g(x, y)$ 的边缘, 得到 $f'(x, y)$ 和 $g'(x, y)$;

(2) 对提取的边缘图像进行 Fourier 变换, 并去幅值, 得到 $|F'(u, v)|$ 和 $|G'(u, v)|$;

(3) 对幅值进行极坐标对数变换, 得到 $|F'(\rho, \theta)|$ 和 $|G'(\rho, \theta)|$;

(4) 用矩阵 DFT 进行相关运算, 估计得到 $-\ln(\alpha)$ 和 β , 从而估计出比例因子 α 和旋转角度 β ;

(5) 将待估计图像 $g(x, y)$ 按估计出来的参数进行旋转和缩放;

(6) 用矩阵 DFT 进行相关运算估计出移位参数 Δx 和 Δy 。

第二步: 用 Keren 算法进行估计

(1) 将待估计图像 $g(x, y)$ 按第一步中估计出的移位参数 Δx 和 Δy 进行移位;

(2) 利用参考图像 $f(x, y)$ 和移位后的待估计图像 $g(x, y)$, 以及计算公式 $(X = C^{-1}V)$ 求 X ;

(3) 利用估计出来的 X 对 $f(x, y)$ 进行旋转、移位操作, 得到 $f'(x, y)$, 然后再求 X' ;

(4) 判断迭代次数是否达到最大或运动估计参数 X' 已经到足够小, 如果是则退出, 否则重复 (2), 直到满足迭代终止条件。

第三步: 综合第一、第二步估计结果, 计算出最终的运动估计参数。

4 实验结果及分析

本文利用 Microsoft Visio C++ 6.0 验证算法的有效性。通过给定的运动参数调节相机拍摄图像。用传统的方法和本文改进的方法对图像进行运动估计, 运动估计结果如表 1 所示, 其中 Δx 为垂直位移, Δy 为水平位移, 单位均为一个像素; β 为旋转角度, 单位为度。若 $\Delta x > 0, \Delta y > 0, \beta > 0$ 分别表示待估计图像相对参考图像向右移动、向下移动、顺时针旋转。

4.1 提取图像边缘效果实验

对于一些细节不明显的图像, 如果不提取图像边缘的话, 运动估计的误差很大。下面对两幅图像进行运动估计验证。图 1 (a) 为参考图像, 图 1 (b) 为待估计图像, 图 1 (c) 为参考图像的边缘, 图 1 (d) 为待估计图像的边缘。

用 Fourier-Mellin 变换法对以上未提取边缘

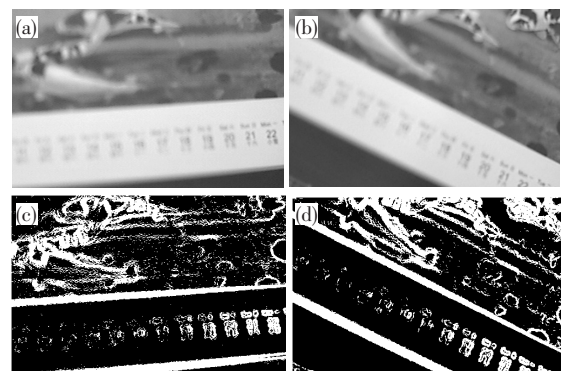


图 1 (a) 参考图像; (b) 待估计图像; (c) 参考图像边缘; (d) 待估计图像边缘。

Fig. 1 (a) Reference image; (b) Estimating image; (c) Margin of reference image; (d) Margin of estimating image.

表 1 运动估计结果

Table 1 Results of motion estimation

运动参数	未提取边缘运动		提取边缘运动	
	估计结果	估计结果	估计结果	估计结果
Δx	-20.275	-0.000	-20.479	20.275
Δy	10.165	0.050	9.370	-10.115
β	30.550	0.030	30.570	-30.520

和提取边缘的图像进行运动估计,结果如表 1 所示。由表 1 可知,对于细节不明显的航拍图像,如果不提取边缘,运动估计效果将远远偏离准确值。因此,为了使 Fourier-Mellin 变换法更具有适应性,应先对图像进行边缘提取,从而达到更准确的估计效果。

4.2 采样数 $N_\theta=128, N_\rho=128$ 效果验证

图 2 (a)~(d)为用相机拍摄的 4 幅图像,以图 2 (a)作为参考图像,对图 2 (b)~(d)进行运动估计,用 Fourier-Mellin 变换进行粗运动估计,用 Keren 算法进行精运动估计。表 2 是待估计图像与参考图像之间的实际运动参数。

表 3 是角度坐标和对数坐标采样点数较多 ($N_\theta=512, N_\rho=512$)和采样点数减为原来的 1/4 ($N_\theta=128, N_\rho=128$)时,用 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法相结合进行运动估计的结果。

表 4 是角度坐标和对数坐标采样点数较多 ($N_\theta=512, N_\rho=512$)和采样点数减为原来的 1/4 ($N_\theta=128, N_\rho=128$)时,用 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法相结合的运动估计算法对 3 幅图像进行运动估计的误差。



图 2 (a) 参考图像;(b)待估计图像 a;(c) 待估计图像 b;(d) 待估计图像 c.

Fig. 2 (a) Reference image; (b) Estimating image a; (c) Estimating image b; (d) Estimating image c.

表 2 实际运动参数

Table 2 Real parameters of movement

	图 2 (a) (参考图像)	图 2(b)	图 2(c)	图 2(d)
Δx	0	-20.61	-1.85	0.88
Δy	0	-10.33	10.16	-2.55
β	0	10.07	-2.69	-0.70

表 3 估计结果比较

Table 3 Comparison of the estimation results

	图 2 (b)	图 2 (c)	图 2 (d)	图 2 (b)	图 2 (c)	图 2 (d)
	$N_\theta=512, N_\rho=512$ (改进前)			$N_\theta=128, N_\rho=128$ (改进后)		
Δx	-20.634	-1.862	0.896	-20.652	-1.825	0.869
Δy	-10.298	10.162	-2.539	-10.285	10.169	-2.568
β	10.063	-2.688	-0.723	10.077	-2.684	-0.718

表 4 估计误差比较

Table 4 Comparison of the estimation errors

	图 2 (b)	图 2 (c)	图 2 (d)	图 2 (b)	图 2 (c)	图 2 (d)
	$N_\theta=512, N_\rho=512$ (改进前)			$N_\theta=128, N_\rho=128$ (改进后)		
Δx 误差	-0.024	-0.012	0.016	-0.042	0.025	-0.011
Δy 误差	0.032	0.002	0.011	0.045	0.009	-0.018
β 误差	-0.007	0.002	-0.023	0.007	0.006	-0.018

由表4可以看出: $N_\theta=128$, $N_\rho=128$ 的估计误差在0.05以内,满足超分辨率图像重建的精度要求(误差在0.4以内)^[12]。

上述实验证明,角度坐标和对数坐标采样点数减少为原来的1/4时,仍可满足超分辨率图像重建的精度要求,但速度却有大幅度提高。

5 结 论

针对超分辨率图像重建中图像运动估计精度要求高、速度快的问题,对传统的基于 Fourier-

Mellin 变换和 Keren 算法的运动估计方法进行改进。将提取边缘用于 Fourier-Mellin 变换中,并基于 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法的特征,分别对 Fourier-Mellin 变换和 Keren 算法进行简化,使得运动估计结果在对精度影响可以忽略的情况下,大幅缩短了运算估计时间,提高了运动估计速度。改进的算法对 328×500 像素大小的两幅图像运动估计需要 1.15 s,而对未改进的算法进行估计需要 3.53 s,速度提高了 3 倍。

参 考 文 献:

- [1] 杨浩,高建坡,吴镇扬. 一种新的图像配准和超分辨率重建算法[J]. 电子与信息学报,2008,30(1):168-171.
- [2] 冯宇平,戴明,孙立锐. 图像自动拼接融合的优化设计[J]. 光学精密工程,2010,18(2):470-476.
- [3] 徐青,张艳,邢帅,等. 遥感影像融合与分辨率增强技术[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [4] Keren D, Peleg S, Brada R. Image sequence enhancement using subpixel displacement[C]//*Proceedings CVPR'88: The Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Washington DC, USA: IEEE Computer Soc. Press, 1988: 742-746.
- [5] 李相国,马晓川. 基于相位相关与 Keren 算法的图像配准[J]. 微计算机与应用,2009,30(11):19-23.
- [6] 吴琼,田越,周春平,等. 遥感图像超分辨率研究的现状和发展[J]. 测绘科学,2008,33(6):66-70.
- [7] 李晓明,赵训坡,郑链,等. 基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法及应用拓展[J]. 计算机学报,2006,29(3):466-470.
- [8] 陈芳民,李馨迟,付明,等. 基于 MATLAB 的傅里叶梅林变换算法图像拼接的实现[J]. 信息工程专辑,2009,30(10):48-50.
- [9] 张显伟,李晓峰,李为民. 一种改进的 Fourier-Mellin 变换的图像拼接技术[J]. 现代制造工程,2009,(4):12-16.
- [10] 郭晓新,许志闻,卢奕南,等. 基于 Fourier-Mellin 不变量的图像配准方法[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):421-424.
- [11] 高莹莹,杨建峰,马晓龙,等. 基于 Fourier-Mellin 算法的干涉图像配准[J]. 光学精密工程,2007,15(9):1415-1420.
- [12] 马金福,薛弘晔. 基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准算法及性能研究[J]. 计算机与数字工程,2008,36(11):134-136.
- [13] 范冲,龚健雅,朱建军. 基于 Keren 改进配准算法的 POCS 超分辨率重建[J]. 计算机工程与应用,2006,36:28-31.